

СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЙ ОДНОФОТОННЫЙ ДЕТЕКТОР С РАЗРЕШЕНИЕМ ЧИСЛА ФОТОНОВ ДЛЯ СИСТЕМ ДАЛЬНЕЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СВЯЗИ

Г. М. Чулкова, А. В. Семёнов, А. В. Дивочий, М. А. Тархов
Московский педагогический государственный университет

Получена 15 ноября 2011 г.

Аннотация. Рассмотрена возможность применения сверхпроводникового однофотонного детектора, разрешающего число фотонов, в качестве датчика приёмных модулей телекоммуникационных линий. Показано, что для достижения доли ошибочных битов на уровне 10^{-11} достаточно на два порядка меньшей мощности в оптическом импульсе, чем при использовании существующих приёмных модулей.

Ключевые слова: сверхпроводниковый однофотонный детектор, разрешение числа фотонов, телекоммуникационные линии.

Abstract. We consider an ability of applying photon number resolving superconducting single-photon detector as a sensor in receiving modules for telecommunication lines. We demonstrate that for achieving bit error rate at the order of 10^{-11} it is sufficient to have two order of magnitude smaller power in an optical pulse as compared to the existing receiving modules.

Keywords: superconducting single-photon detector, photon-number resolution, telecommunication lines.

Все возрастающие потоки информации и развитие техники оптической связи стимулируют выработку все более жестких требований к скорости и достоверности передачи информации. Создание практических сверхпроводниковых однофотонных детекторов с разрешением числа фотонов (PNR-SSPD), принцип действия которых основан на неравновесных процессах, происходящих при поглощении фотона в сверхпроводящих наноструктурах - длинных и узких (70-100 нм) полосках ультратонкой пленки (4 нм), нанесенной

на диэлектрическую подложку, в присутствии тока, близкого к критическому, продиктовано необходимостью удовлетворения этим требованиям [1]. PNR-SSPD обладает высокой квантовой эффективностью (30%) на длинах волн 1300 и 1550 нм, уровнем темнового счета менее 10 Гц, субнаносекундной длительностью импульса, обеспечивающей максимальную скорость счета более 1 ГГц, нестабильностью переднего фронта импульса (джиттер) 16 пс и высокой эффективностью согласования с одномодовым оптоволоконном.

Сверхпроводниковый однофотонный детектор с разрешением числа фотонов (PNR-SSPD) представляет собой структуру, изображенную на Рис. 1. Структура состоит из одинаковых секций полосок в виде меандра, соединенных параллельно, и подключенных к контактным площадкам через полосковые резисторы. Площадь детектора $10 \times 10 \text{ мкм}^2$.

Механизм возникновения импульса напряжения следующий: по полоске сверхпроводника протекает постоянный электрический ток, плотность которого близка к критической. При поглощении фотона в небольшой области полоски сверхпроводимость подавляется и появляется «горячее пятно», при этом происходит перераспределение тока и его плотность превышает критическую. Т.к. полоска очень узкая, «горячее пятно» перекрывает сечение полоски и возникает резистивная область, что сопровождается импульсом напряжения. В течение небольшого времени «горячее пятно» исчезает, сверхпроводимость восстанавливается, и детектор вновь готов к регистрации очередного фотона.

В момент поглощения фотона в одной из полосок появляется сопротивление. Благодаря кинетической индуктивности, которой обладают полоски, резистивная полоска не закорачивается остальными, оставшимися в сверхпроводящем состоянии, полосками, что приводит к возникновению напряжения на всей структуре. Если в двух полосках одновременно поглощаются фотоны, напряжение на структуре будет больше, создавая больший по амплитуде импульс напряжения в линии передачи. Если три фотона поглощаются тремя полосками, импульс напряжения будет еще больше, и т.д. Это дает возможность различать число поглощенных фотонов по амплитуде

возникающего отклика. Последовательно с каждой полоской включен пленочный резистор, изготовленный из несверхпроводящего металла. Резисторы необходимы для ограничения тока и препятствуют одновременному переключению нескольких полосок при поглощении одного фотона.

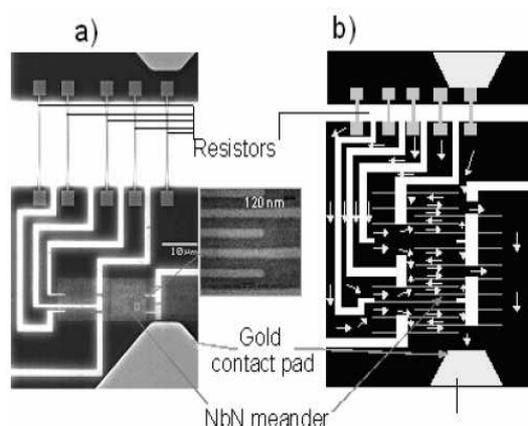


Рис. 1 а) Изображение 5- секционного PNR-SSPD, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа, черный цвет-пленка NbN; б) схема соединения секций детектора с контактными площадками.

На Рис. 2 показаны осциллограммы импульсов напряжения с PNR-SSPD при разных уровнях ослабления потока излучения импульсного лазера на длине волны 0,89 мкм, полученные на 5-секционном PNR-SSPD. Напряжение фотооткликов, соответствующих различному числу поглощенных фотонов, имеют различные амплитуды. С увеличением числа фотонов в лазерном импульсе вероятность наблюдения отклика с большей амплитудой возрастает [2].

Чтобы в протяженных линиях связи, содержащих множество усилителей и мультиплексоров, накопленная ошибка не превысила допустимую норму, BER (доля ошибочных битов) каждого устройства должен быть не хуже 10^{-11} . Основным фактором, определяющим уровень ошибок соединения, является чувствительность и быстродействие приемного модуля оптического терминала.

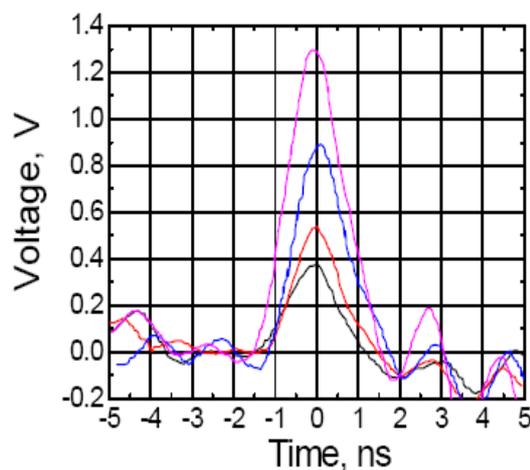


Рис. 2. Эпюры напряжения, соответствующие различному числу одновременно зарегистрированных фотонов.

Применяемые в настоящее время лучшие р-і-п диоды и лавинные фотодиоды обеспечивают BER на уровне 10^{-10} - 10^{-12} в оптическом интерфейсе 2,5 Гбит/с – 9,95 Гбит/с при чувствительности -28 дБм и -15 дБм соответственно. Это означает, что каждый бит информации передается оптическим импульсом, содержащим 10^4 - 10^5 фотонов. Чувствительность приемников ограничивает длины оптоволоконных линий связи между ретрансляторами. Наименьшим ослаблением оптического сигнала обладают оптоволоконные линии на одномодовых волокнах, но и в таких магистралях мощность передаваемых импульсов ослабляется в среднем в 100 раз на каждые 100 км. Актуальной, таким образом, является разработка высокочувствительных приёмных модулей, способных обеспечивать требуемые BER при работе с предельно слабыми сигналами.

Число фотонов в оптическом импульсе, необходимое для достижения требуемой BER при использовании PNR- SSPD в качестве детектора приёмного модуля, может быть оценено по формулам теории вероятности как

$$N \approx \ln 10 \lg BER / QE ,$$

где QE – квантовая эффективность детектирования. Для лучших стандартных SSPD (работающих только в однофотонном режиме) эта величина достигает 30%. Полагая QE=10%, получаем, что для достижения BER на уровне 10^{-11}

требуется иметь в оптическом импульсе ≈ 250 фотонов, что в среднем на 2 порядка меньше, чем при использовании существующих приёмных модулей.

Для справедливости приведённой оценки необходимо, чтобы среднее число отсчётов детектора в логическом нуле было мало по сравнению с единицей. Благодаря крайне низкому уровню собственных темновых срабатываний SSPD, единственной причиной таких отсчётов в случае PNR-SSPD остаются паразитные фотоны, приходящие на детектор в фазе логического нуля, т.е. шумы оптической передающей линии. Для современных линий стандартом является отношение мощностей, соответствующих уровням логического нуля и логической единицы не менее 15 дБ. При среднем числе фотонов в фазе логической единицы $N \approx 250$ среднее число фотонов в фазе логического нуля составит $10^{-3}N \approx 0.25$, а среднее число отсчётов детектора в логическом нуле – $QE \times 10^{-3}N \approx 0.025 \ll 1$, что подтверждает самосогласованность приведённой оценки для N .

Точное значение BER зависит от уровня дискриминации M – числа отсчётов детектора, принимаемого в качестве граничного значения между 0 и 1. При слишком низком значении уровня дискриминации велико число ошибок ложной регистрации «1» в логическом «0», при слишком высоком – велико число ошибок пропуска логической «1». Результаты численного расчёта зависимости BER от уровня дискриминации приведены на рис. 3. Кривые построены для среднего числа отсчётов в логической единице 35 и 50. Видно, что требуемый уровень $BER=10^{-11}$ достигается при 50 отсчётах в импульсе при $M=10$.

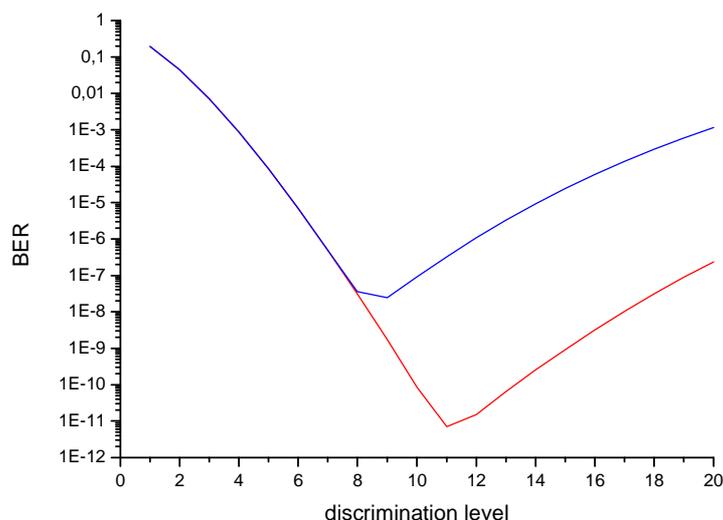


Рис.3 Зависимость доли ошибочных битов от уровня дискриминации. Среднее число отсчётов в фазе логической «1» – 35 (синяя кривая) и 50 (красная кривая). Среднее число отсчётов в фазе логического «0» положено равным 0.5.

Таким образом, применение PNR-SSPD позволит значительно снизить количество необходимых ретрансляторов в оптических передающих линиях связи благодаря увеличению не менее чем в 10^2 раз чувствительности приемных модулей.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и образования в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2012 годы».

Литература

1. *A.Divochiy, F.Marsili, D.Bitauld, et al. // Nature Photonics, 2, 302, (2008).*
2. *A Korneev, A Divochiy, M Tarkhov, et al. // Journal of Physics: Conference Series 97, 012307 (2008).*